



TITLE:

Studies on underlying mechanism of
interlimb coordination of legged robots
using nonlinear oscillators(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Fujiki, Soichirou

CITATION:

Fujiki, Soichirou. Studies on underlying mechanism of interlimb coordination of legged robots using nonlinear oscillators. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18946>

RIGHT:

許諾条件により本文は2016/03/01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	藤木 聡一郎
論文題目	Studies on underlying mechanism of interlimb coordination of legged robots using nonlinear oscillators (非線形振動子を用いた脚ロボットの肢間協調メカニズムに関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>ヒトや動物のように多様な環境における高い踏破性の獲得を目指して、近年多くの脚移動型のロボットが開発されている。しかしながら、その一般的な方法論は確立されていない。ヒトや動物は、その身体構造に多くの自由度を持つにもかかわらず、巧みに身体を制御して、適応的な歩行を実現している。特に、歩行速度や環境変化に応じてさまざまに歩容を変えるなど、脚間の運動を状況に応じて協調的に動かしている。適応的な歩行の実現には、このような適応的な肢間協調を生み出す神経系の機能的役割を理解することが不可欠である。これまで、神経生理学的研究より、ヒトや動物の神経系には上位指令や感覚情報に基づいてリズム的な運動指令を生成する Central Pattern Generator (CPG) と呼ばれる神経回路が存在すると言われている。そして、この CPG の特性に基づいて、非線形振動子を用いた脚ロボットの制御器が提案されている。本研究では、このような非線形振動子を用いた制御器を用い、脚ロボットの歩行運動において適応的な肢間協調が実現されるメカニズムを力学的に解明することを目的としている。</p> <p>本論文の第 1 章では、研究背景として、肢間協調の最も典型的な例である動物の歩行速度に応じた歩容の遷移と、左右分離型トレッドミルを用いたヒトや動物の肢間協調の変化について述べ、適応的な肢間協調の生成に関連する神経生理学的な知見について述べている。そして、本研究の手法である、ロボットと神経生理学的な知見に基づく神経制御モデルから構成されるシンプルな力学モデルを用いた研究アプローチについて説明している。</p> <p>第 2 章では、6 脚ロボットと各脚に配置した非線形振動子を用いた制御系を用いた、動力学シミュレーションを行っている。非線形振動子は互いに相互作用し、脚先の接地センサからの信号に応じて振動子の位相を瞬時にシフトさせる機能（位相リセット）を持つ。動力学シミュレーションの結果、昆虫と同様に歩行速度の変化に対して歩容が遷移し、その歩容遷移においてヒステリシス現象が現れることを示した。この結果から、この力学モデルが歩容の遷移を実現する力学要素をとらえていることが示唆される。</p> <p>第 3 章では、2 脚ロボットの歩行における適応機能を調べるために、2 章で構築した非線形振動子を用いた制御系を用いて左右分離型トレッドミル上での歩行実験を行った。左右分離型トレッドミルは左右のベルトの速度を独立に制御することができ、左右非対称な環境を人為的に作ることができる。ヒトはこの特殊な環境で、Early adaptation と Late adaptation と呼ばれる 2 つの適応が肢間協調に見受けられることが知られている。ロボットの実験結果から、トレッドミルを左右対称な速度条件から左右非対称な速度条件へと変化させたとき、制御パラメータを変化させなくても、位相リセットを有する非線形振動子系の位相調整機能により、安定な歩行が実現された。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	藤木 聡一郎
<p>さらには、ヒトの Early adaptation と同様の振る舞いを示すことが確認された。この結果から、第 2 章の 6 脚ロボットの 歩容遷移を実現させたものと同じ制御器を用いて左右分離型トレッドミルにおける適応的な歩行が実現されることが示された。</p> <p>第 4 章では、第 3 章と同様に 2 脚ロボットの左右分離型トレッドミル歩行における肢間協調について調べている。ここでは、小脳の有する学習的な運動調整機能に着目し、接地タイミングの設計値と実際の値の誤差情報に関する評価関数を設定し、それに基づいて制御パラメータ（接地タイミングの設計値）を調整する機構を、3 章で用いた非線形振動子を用いた制御系に組み込んだ。動力学シミュレーションと実機実験を行った結果、肢間協調においてヒトの Early adaptation に加えて、Late adaptation と同様の振る舞いを示すことが確認された。このことから、ヒトや動物のような肢間協調を実現させるためには、接地タイミングの学習的な調整が重要であるという示唆を与えた。</p> <p>第 5 章では、本論文のまとめと、今後の課題について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、適応的な歩行生成に重要な肢間協調に着目し、生物の脳神経系を参考に非線形振動子を用いて設計した歩行制御系を用いて、脚ロボットの肢間協調メカニズムを力学的観点から研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 肢間協調の典型的な例である歩行速度に応じた歩容生成とその遷移を調べるために、足の接地情報に基づく反射的な作用を導入した非線形振動子からなる歩行制御系と 6 脚ロボットを用いた動力学シミュレーションが行われている。その結果、歩行速度に応じて複数の歩容が生成され、歩行速度の変化に対してそれらの遷移が起こることが確認されている。更に、動物の歩容遷移において見受けられるヒステリシス現象が生じることも確認されている。すなわち、この歩行制御系を用いることで、生物の歩容生成とその遷移を例として、肢間協調に見受けられる力学的特性が再現されていることが確認されている。
2. 特殊な歩行環境である左右分離型トレッドミル上でのヒトの肢間協調に着目し、上記 1 で用いた非線形振動子による歩行制御系を実装した 2 脚ロボットの左右分離型トレッドミル上での歩行実験が行われている。その結果、ヒトの歩行に見受けられる 2 種類の適応 (Early adaptation と Late adaptation) のうち Early adaptation と同様の適応的な振舞いが現れることが確認されている。すなわち、この特殊な歩行環境においても、上記 1 と同様の制御系を用いることで適応的な肢間協調の振舞いを説明できることが示されている。
3. ヒトの左右分離型トレッドミル歩行の肢間協調にみられる Late adaptation について調べるために、上記 1、2 で用いた歩行制御系に小脳を参考にして足の接地タイミングに関する学習モデルを組み込み、2 脚ロボットの動力学シミュレーションとハードウェア実験による検証が行われている。その結果、上記 2 で見受けられた Early adaptation に加えてヒトと同様の Late adaptation も発現することが確認されている。更に、この適応メカニズムについて力学的な考察が行われている。これらより、接地タイミングの学習的な調整がヒトの適応的な肢間協調の実現に寄与することが示されている。

以上のように本論文は、生物の神経系の活動のモデルとして振動子から構成される制御系と脚ロボットを用いた動力学シミュレーションとハードウェア実験を行い、肢間協調のメカニズムについて力学的観点に基づいて解釈を行ったものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。